

公交系统复杂网络抗毁性分析^{*}

——以重庆市公交换乘网络为例

朱中华¹, 杨德刚²

(1. 重庆广播电视大学 学生处, 重庆 400052; 2. 重庆师范大学 计算机与信息科学学院, 重庆 401331)

摘要:为揭示公交网络的复杂性及演化机理, 本文利用复杂网络相关理论知识和 PAJEK 软件分析重庆市主城区公交复杂网络的抗毁性, 选择随机攻击和蓄意攻击两种模式。随机攻击就是完全随机地删除网络中的节点, 蓄意攻击就是从网络中按照度值由大到小的顺序删除节点。以重庆市公交换乘网为复杂网络模型, 研究该模型受到这两类攻击后, 用平均最短路径长度和平均集聚系数来描述网络的抗毁性, 并绘制相关示意图, 由此分析并得出结论: 重庆市公交网络具有鲁棒而又脆弱的抗毁特性。

关键词:复杂网络; 抗毁性; 公交网络

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2014)01-0089-05

随着城市化与机动化的全面推进, 中国大城市的交通拥挤现象日益突出, 为了解决这种现象, 较为常用的研究方法有博弈原理和复杂网络^[1], 最近几年复杂网络的研究得到国内外众多研究学者的关注, 复杂网络研究正渗透到数理科学、生命科学和工程学科等众多不同的领域, 对复杂网络的定量与定性特征的科学理解, 已成为网络时代科学研究中一个重要的挑战性课题, 甚至被称为“网络的新科学”。就目前而言, 对复杂网络的研究方向大致在以下几个方面^[2]: 1) 探究复杂网络拓扑结构的动态问题; 2) 运用模拟现实世界的算法来重新生成几何统计量, 较为经典的算法有生成高度聚类社会网络的算法和生成无标度网络的算法; 3) 研究复杂网络的限制因素是怎样影响整个网络的, 即研究网络受破坏时的抗毁性。抗毁性的定义有多种, 图论中网络抗毁性是指网络在人为破坏下的可靠性, 它从网络连通性的角度描述了拓扑结构对网络可靠性的影响。文献[3]中对抗毁性的定义是: 网络中的节点或边在遭受故意攻击或发生随机失效的条件下, 网络维持其功能的能力。该定义表示, 要进行网络抗毁性的研究, 应该完成下面 3 个方面的工作: 1) 网络抗毁性分析的度量; 2) 网络失效模式的选择; 3) 维护网络的策略。

1 重庆市公交复杂网络建模

复杂网络的建模问题, 以实证研究为推动力, 重视计算机建模的作用。从实证领域寻找各种复杂系统结构的拓扑特性, 提出基于复杂网络动态特性的复杂网络建模方法, 基于该方法建立具有时变动态特性的复杂网络模型, 提出新的计算复杂网络统计特征向量的算法^[4-6]。

公共交通网络包含停靠站点和线路两个基本要素, 从考察公交线路之间的关系、公交系统的换乘特点、以及公交系统停靠站点之间的关系等 3 个方面出发, 可以构建公交线路、公交换乘和停靠站点 3 个公交复杂网络。本文采用公交换乘网络来构造重庆市区公交复杂网络, 因为评价一个城市公交网络的可达性的一个重要指标是换乘次数, 换乘次数越少, 可达效率越高, 市民出行越便利。在公交换乘模型中, 公交站点为结点, 如果两个结点之间有共同的公交线路通过, 那么这两个结点有边连接, 节点的度定义为连接该结点数。公交网络数据的选取作如下说明:

1) 本文以城区的公交网络为实例, 没有选取郊区专线和通宵线路。

2) 在重庆市区公交线路中, 有些线路分为上行和下行线路, 如果上下行线路经过的站点大致相同时, 考虑到这样的线路比例很低但又不易分开处理, 本文只选取上行线路站点为研究数据; 如果上下行线路经过的站点有

* 收稿日期: 2013-02-25 修回日期: 2013-06-23 网络出版时间: 2014-01-16 08:16

资助项目: 国家自然科学基金 (No. 10926170; No. 10971240); 重庆市自然科学基金 (No. cstc2012jjA40052; No. cstc2013jcyjA80013); 重庆市委科技计划项目 (No. KJ130611; No. KJ120615; No. KJ120630)

作者简介: 朱中华, 助教, 研究方向为复杂网络, E-mail: 40815153@qq.com; 通讯作者: 杨德刚, E-mail: ydg42@163.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20140116.0816.023.html>

很大区别时,分别作为两条线路来研究。

从爱帮网上逐条线路复制到 Excel 表中,整理好将 Excel 表导入到 SQL Server 2000 服务管理器中,用 SQL 语句编程,将编程获得的数据保存到记事本中,以如图 1 所示的格式存储:

其中 * Vertices 1305 表示站点数,即结点数,* Edges 下面数据表示结点 1 即 11 中与结点 45 有边连接。将以上数据保存为 .net 文件格式,用 PAJEK 软件绘制结点数为 1305 个,边数为 41 820 条的重庆市区公交复杂网络示意图,如图 2 所示。再将 .net 格式文件保存为 .mat 格式,得到公交站点之间的链接矩阵,对其编程在 Matlab 平台运行,即可获得重庆市区公交复杂网络的拓扑参数,如度分布、平均路径长度、集聚系数等,并对其分析总结。

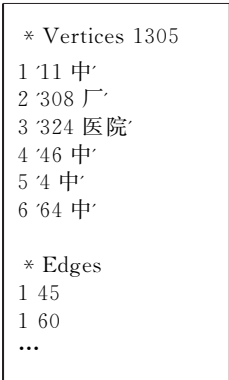


图 1 数据保存格式

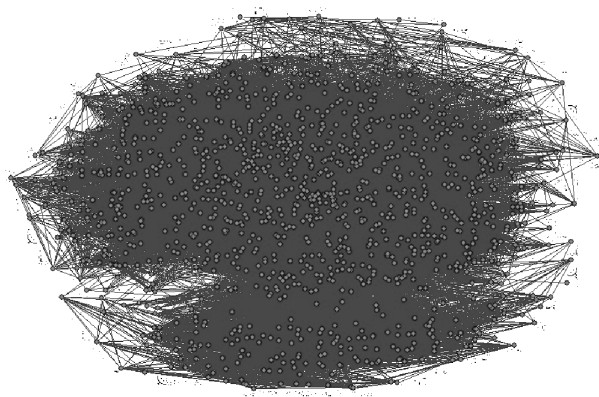


图 2 重庆市公交复杂网络图

2 重庆市公交复杂网络拓扑性质

2.1 度及度分布

节点的度是复杂网络众多属性中最简单但又是最重要的性质,网络中一个节点 i 的度定义为与它相连的节点数目,用 k_i 表示。经编程计算得出重庆市区公交复杂网络中所有节点的平均度是 62.064 4,节点度最大值 $k_{\max}=373$,这个站点是上清寺,表明从这个站到其他 372 个站坐公交不用转车就可到达,该站点对于重庆市区公交网络来说是个相当重要的中心枢纽。如果该站点发生阻塞,将引起整个区的交通瘫痪,后果将不堪设想。为此道路交通部门应该切实保障这类站点的正常、高效运行。

网络中节点的度分布用分布函数 p_k 表示,可以理解为任意一个节点的度恰好有 k 的概率, p_k 的计算为度 k 的节点个数占节点总个数的比例,即

$$P(k)=\frac{N(k)}{N}$$

(1)

网络节点度的度分布是网络的重要几何性质,规则网络中每个节点的度值相同,符合 Delta 分布,随机网络的度分布服从 Poisson 分布,而大量的实际网络存在幂律形式的度分布,称为无标度网络,同时在现实中还有很多网络的度分布服从指数分布。该实例网络模型的度分布满足指数分布,具有无标度网络特性,如图 3 所示。

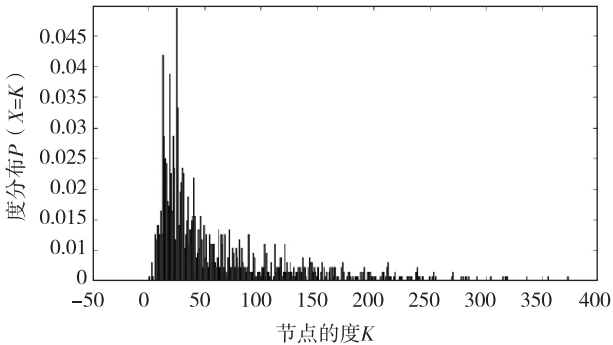


图 3 重庆市公交复杂网络度分布图

2.2 平均路径长度

本文中的实例选取的是公交换乘网络模型,所以同一条线路上的站点是全连通的,即一条线路上的结点之间的路径长度为 1,但整个网络的路径长度取所有结点路径长度的平均值。经编程统计得出重庆市公交复杂网络的平均路径长度是 2.567 3,即两个站点之间平均需要换乘 1.567 3 次即可到达。该网络中没有两个站点是不可达的,也就是说从一个站点出发经过有限次的换乘公交总能到达别一个目的站点,网络换乘到达率为 100%,没有通过公交换乘不能到达的站点。

表 1 对北京、上海、天津和重庆 4 个直辖市的公交换乘网络作了对比^[7-9],重庆公交线路数和站点数最小,但平均路径长度和平均换乘次数不是最小。这一结果显示重庆市的公共交通从换乘角度来看,还有待进一步完善。当然,也可能跟重庆市区的地理特征组团式结构有关系,而其他 3 个城市的地理特征是摊大饼式结构,为此,可以从地理特征着手,研究设计出适合重庆市区地理特征的公交网络。

2.3 集聚系数

集聚系数用来描述网络中节点的聚集情况,即

表 1 4 大城市公交换乘复杂网络对比表

城市	公交线路数	公交站点数	平均路径长度	平均换乘次数
北京	616	4 177	2.727 34	1.727 34
上海	504	1 982	2.9	1.9
天津	292	2 726	2.122 32	1.122 32
重庆	302	1 305	2.567 3	1.567 3

网络的紧密程度。在本实例中,集聚系数越大,表明该站点与邻居站点之间的换乘情况越好。Dorogovtsev^[10]指出,有 3 种不同的衡量集聚特性的参数,分别为

$$1) \text{局部集聚系数 } C(k) = \frac{\langle m_{nn}(k) \rangle}{k(k-1)/2} \quad (2)$$

其中, $\langle m_{nn}(k) \rangle$ 表示度为 k 的结点的邻居之间平均存在的连接数。

$$2) \text{平均集聚系数 } \bar{C} = \sum P(k)C(k) \quad (3)$$

其中, $P(k)$ 表示图中任意一个节点的度数为 k 的概率,即节点的度分布。

$$3) \text{集聚系数 } C = \frac{\sum_k P(k) \langle m_{nn}(k) \rangle}{\sum_k P(k) k(k-1)/2} = \frac{\sum_k k(k-1)P(k)C(k)}{\langle k^2 \rangle - k} \quad (4)$$

其中, $\langle k^2 \rangle$ 表示节点度的二阶矩阵,而 k 点表示平均节点度数。

在本文中,采用平均集聚系数来衡量公共交通换乘网络的集聚特性。计算后得到网络的平均集聚系数 0.731 6,表明重庆市区公交网络的局部站点密度很大,具有很好的集聚特性,这个参数能很好地说明重庆市区具有组团式的地理特征。

3 重庆市公交复杂网络抗毁性分析

公交网中的站点受到破坏或阻塞后,公交网的可靠性会相应下降,主要表现为网络平均路径长度的变化,根据公交网失效站点是否具有选择性,将公交网络失效形式分为蓄意攻击失效和随机攻击失效两种类型,第一种类型是有选择性的,如群众集会、交通枢纽堵塞和恐怖袭击等;第二种类型具有随机性,如突发性交通事故和重大山体滑坡等。

本文实例中网络的节点代表公交站点,如果该节点失效或失去后,将会引起网络结构上的变化。在真实的公交网络中,当一个站点受到破坏后,经过该站点的公交线路会选择改道,或设置一些临时站点来保持公交线路的正常运行,像这样的情况,研究起来比较复杂,在本文中,对结点的失效做简化处理,假定一个结点失效后,删除与该结点相连的所有边。如图 4 所示,删除两个结点后,结点 A 和 B 之间的最短路径长度由 2 变为 6,原来的一个集团分裂成为 1 个集团分裂成 2 个集团和 3 个孤立的结点。

研究一个复杂网络的抗毁性,就要找到符合该网络抗毁性的测度,城市公交网络的抗毁性是从整个网络的拓扑结构来描述的,一般采取的抗毁性的度量参数有:平均最短路径长 L 、最大连通成分相对大小 S 、平均集聚系数 C 、网络效率 E 。结合本实例具体情况,选用平均路径长度 L 和平均集聚系数 C 作为重庆主城公交网络的抗毁性测度,并对随机攻击和蓄意攻击两种策略进行仿真。

3.1 平均路径长度变化图

实验过程如下:1)随机攻击实验中每次随机删除网络中 1% 的结点后,求平均路径长度;2)蓄意攻击实验中按照节点度值由大到小的顺序每次删除网络中 1% 的结点,同时每次求平均路径长度。

实验过程中每次选取 1% 结点进行删除是基于时间复杂度和微机性能的综合考虑,平均路径长度的算法是利用 Floyd 算法求解出任意两节点的距离,再求距离的平均值即为网络的平均路径长度,由于该网络模型中的结点数较大,微机处理能力有限,每次计算时间长达 40 多分钟。按照上述的实验步骤,以重庆市区公交换乘复杂网络为例,分别采取随机攻击和蓄意攻击两种方式对其仿真,分别得到随机攻击平均路径长度与删除结点比例之间的关系示意图(图 5)和蓄意攻击平均路径长度与删除结点比例之间关系图(图 6)。

从图 5、图 6 中观察到,在随机攻击和蓄意攻击两种策略下,平均路径长度总体上慢慢变大,之所以会变大,是因为随着网络节点的删除,网络的整体连通程度变得越来越不紧密。两种攻击策略不同的是在随机攻击情况下,网络的平均路径长度以 3 个组团为整体的跳跃式增长,这 3 个组团类似于复杂网杂网络中的社区,这与重庆市区的地理特征相似,重庆市城区是由沙坪坝区、渝中区、渝北区等几个主城区组成。再细察图 5,每个社区中结点的路径长度变化不一,第一个社区从 2.570 骤变到 2.579,又从 2.580 降到 2.578,然后再一次从 2.578 增加到 2.586。第二、三个社区中结点的最短路径长度是缓慢地发生变化。在蓄意攻击方式下,由于是按节点度值从大

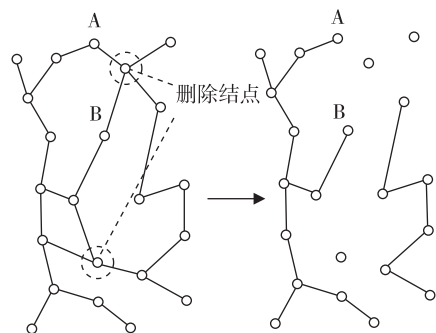


图 4 删除结点对网络影响示意图

到小的顺序删除结点,整个网络中结点的最短路径长度呈线性变大。

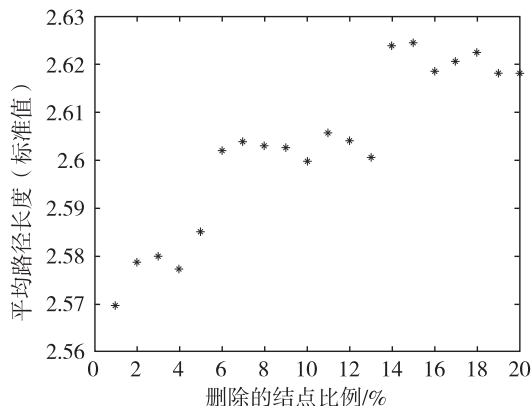


图 5 随机攻击后平均路径长度变化图

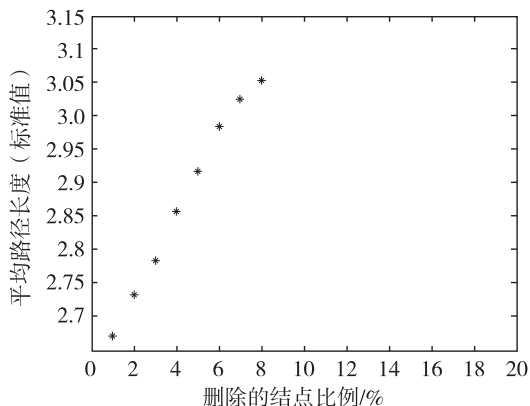


图 6 蓄意攻击后平均路径长度变化图

3.2 平均集聚系数变化图

实验过程如下:1)随机攻击实验中每次删除网络 1%的结点,每次计算整个网络的集聚系数;2)蓄意攻击实验中按照节点的度值由大到小顺序的每次删除 1%结点,每次计算整个网络的集聚系数。

按照上面实验过程,分别得到随机攻击网络平均集聚系数与删除结点比例之间的关系图(图 7)和蓄意攻击平均集聚系数与删除结点比例之间关系图(图 8)。本实例的公交网在两种攻击策略下,集聚系数都是随着删除结点比例的增大,平均集聚系数的变化有很大差别,但总体上是变小直到为 0,这是因为当整个网络在删除结点到一定程度情况下,网络的孤立结点越来越多,网络会变成互不相连的成分,网络的平均集聚系数的变化不连续。网络在随机攻击方式下,网络的平均集聚系数平稳变小,图 7 中,在系数为 0.8 时开始迅速下降,直至降到为 0。图 8 中,网络的平均集聚系数以线性方式增大,但并不表明网络的连通程度变大,当达到系数峰值 0.82 时,平均集聚系开始很快降低,降到 0.72 处又一次增大,但增幅没有之前的幅度大,最终网络的集聚系数跳跃式地接近为 0。

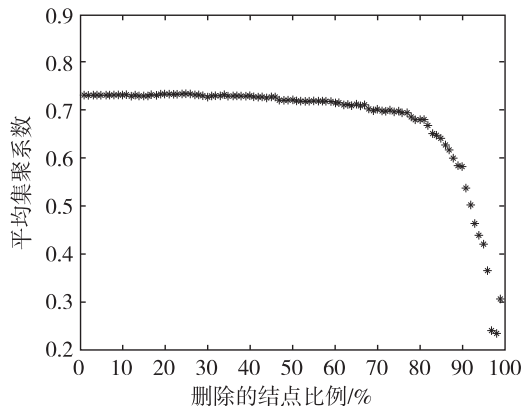


图 7 随机攻击后平均集聚系数变化图

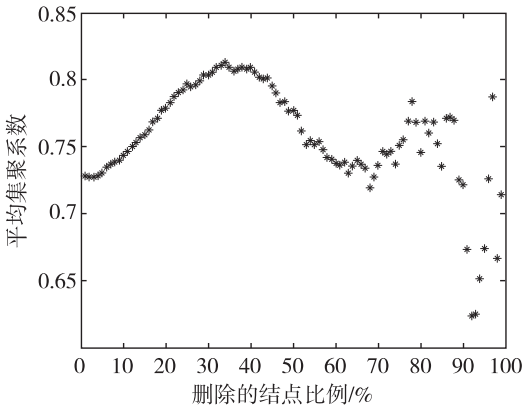


图 8 蓄意攻击后平均集聚系数变化图

通过以上的分析可以得出,重庆市公交网同大多数的真实复杂网络相似,遇到随机攻击时,整个网络具有高度的鲁棒性,遇到蓄意攻击时具有脆弱性,而这种鲁棒又脆弱的抗毁特性是因为整个网络中结点的度分布的不均匀性所造成的。

4 结论

本文首先介绍了复杂网络抗毁分析的重要性及意义,给出复杂网络抗毁性的几种定义,简单介绍了复杂网络抗毁性研究的现状,再简要阐述复杂网络的鲁棒性特征及常用复杂网络相继故障动态模型。然后重点对重庆市公交网络的抗毁性作了分析,分别采用了随机攻击和蓄意攻击两种方式研究该复杂网络的抗毁性,选取网络结点的平均路径长度和平均集聚系数为抗毁性的度量参数,给出简单的仿真实验过程,在 Matlab 软件上编程,分别绘制在不同攻击方式下平均路径长度与删除结点比例的关系图和平均集聚系数与删除结点比例的关系图,再根据仿真出来的实验图进行分析,最后得出结论:重庆市公交网具有鲁棒而又脆弱的抗毁特性。

本文用重庆完整的公交数据进行实验仿真来分析公交复杂网络的抗毁性是本文的特点,与其他论文相比,不足之处是:当公交网络的站点遭到破坏后,应急预案“哪里来,为什么,是什么,为什么,有什么,做什么”缺乏深入思考^[11]。

参考文献:

- [1] 董甜甜,谭建春. 博弈原理在解决交通拥挤中的分析[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版,2012,30(3):99-102.
Dong T T, Tan J C. Analysis on game theory in traffic congestion[J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science, 2012, 30(3): 99-102.
- [2] 王林,戴冠中. 复杂网络的 Scale-free 性、Scale-free 现象及其控制[M]. 北京:科学出版社,2009.
Wang L, Dai G Z. Scale-free nature and Scale-free phenomenon of the complex network and its control [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [3] 谭跃进,吕欣,吴俊,等. 复杂网络抗毁性研究若干问题的思考[J]. 系统工程与理论实验,2008(8):116-120.
Tan Y J, Lv X, Wu J, et al. Reflections on the complex network invulnerability number of issues[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2008(8): 116-120.
- [4] 高自友,赵小梅,黄海军,等. 复杂网络理论与城市交通复杂性问题的相关研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2006,6: 41-47.
Gao Z Y, Zhao X M, Huang H J, et al. Research on complex network theory and urban traffic complexity of problems[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2006, 6: 41-47.
- [5] 陈守刚. 基于复杂网络理论的电力网络的研究[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版,2008,25(Suppl. 2):78-79.
Chen S G. Research on electricity network based on complex network theory[J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science, 2008, 25(Suppl. 2): 78-79.
- [6] Newman M E J, The structure and function of complex network[J]. Nature, 2000, 406: 378-382.
- [7] 赵金山,狄增如,王大辉. 北京市公共汽车交通网络几何性质的实证研究[J]. 复杂系统与复杂性科学,2005,2(2):47. Zhao J S, Di Z R, Wang D H. Empirical research on public transport network of Beijing[J]. Complex Systems And Complexity Science, 2005, 2(2): 47-51.
- [8] 张晨,张宁. 上海市公交网络拓扑性质研究[J]. 上海理工大学学报,2006,28(5):491-494.
Zhang C, Zhang N. Topology research on Shanghai public traffic network[J]. University of Shanghai for Science and Technology, 2006, 28(5): 491-494.
- [9] 赵俊红,马军海,李瑞山. 基于天津市公共交通网络的复杂性研究[J]. 复杂系统与复杂性科学,2009,6(4):76-81.
Zhao J H, Ma J H, Li R S. Based on public transport network complexity of Tianjin [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2009, 6(4): 76-81.
- [10] Dorogovtsev S N. Clustering of correlated networks[J]. Physical Review E, 2004, 6(4): 76-81.
- [11] 殷涛. 交通运输业突发事件应急预案体系构建——以四川省为例[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2013,4(4):102-105.
Yin T. Construction of an emergency plan system of transportation industry——Take Sichuan province as an example[J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2013, 4(4): 102-105.

Analysis of Survivability of the Bus Complex Network in Chongqing

ZHU Zhong-hua¹, YANG De-gang²

(1. Student Affair Office, Chongqing Radio & TV University, Chongqing 400052;

2. College of Computer and Information Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: In order to reveal the complexity and evolution mechanism of the public transport network, this paper aims at analyzing the survivability of the bus complex network in Chongqing by using the relevant theories of the complex network and PAJEK software and by choosing the random attack strategy and the deliberate attack strategy. The random attack strategy means completely deleting the nodes of the network at random; the deliberate attack strategy means deleting the nodes in descending order of the value in network. Taking the bus transfer in Chongqing as the complex network model, this model uses the average shortest path length and average clustering coefficient to measure survivability of the network after it is attacked by the above two types of attacks and draws the relevant schematic diagram. We can draw the conclusion from above analysis: the bus network in Chongqing has the robust-yet-fragile characteristics.

Key words: the complex network; survivability; bus network

(责任编辑 游中胜)